УДК 620.179.15

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПОСОБОВ ТРАНСМИССИОННОГО ГАММА-КОНТРОЛЯ ПОКРЫТИЙ

В.А. Забродский, И.О. Недавний, О.А. Сидуленко

ФГНУ «НИИ интроскопии». г. Томск
E-mail: mail@introscopy.tpu.ru

Выполнено математическое описание алгоритмов обработки информации при трансмиссионном гамме-контроле покрытий для случаев измерения потоков первичного излучения источника и рентгенофлуоресцентного излучения покрытия. Определены условия, при которых изменения параметров основы не влияют на результат измерения толщины покрытия.

В простейшем случае, когда толщина основы известна из технической документации на изделие, может быть использован способ измерения потока прошедшего через изделие излучения источника. Для случая моноэнергетического источника уравнение переноса излучения имеет вид

$$F_1 = \frac{N_0}{N} = \exp(\mu_n h_n + \mu_0 h_0), \qquad (*)$$

где N и N_0 – поток гамма-квантов на входе в детектор при наличии и отсутствии контролируемого изделия; μ_n и μ_0 – линейный коэффициент ослабления излучения источника для материалов покрытия и основы; h_n и h_0 – толщина покрытия и основы.

В соответствии с общепринятыми допущениями, например [1]:

$$F'_x \approx \frac{\Delta F}{\Delta x},\ \Delta x = \frac{\Delta F}{F'_x} = \frac{\Delta F/F}{F'_x/F},\ \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta F/F}{xF'_x/F},$$

где F – измеряемая функция; ΔF, $\Delta F/F$, Δx, $\Delta x/x$ – абсолютная и относительная погрешность измерения и соответствующие изменения значений определяемой физической величины x.

Введем обозначения:

$$F'_x/F = \psi_\Delta, \quad xF'_x/F = \psi_\delta,$$

где ψ_Δ, ψ_δ – чувствительность измеряемой функции F к абсолютному и относительному изменению определяемой физической величины x.

В нашем случае согласно (*)

$$K_\Delta = \psi_{\Delta n}/\Psi_{\Delta 0} = \mu_n/\mu_0,$$

$$K_{\Delta\delta} = \Psi_{\Delta n}/\Psi_{\delta 0} = \mu_n/\mu_0 h_0,\ K_\delta = \Psi_{\delta n}/\Psi_{\delta 0},$$

где $\Psi_{\Delta n}$, $\Psi_{\delta n}$, $\Psi_{\Delta 0}$, $\Psi_{\delta 0}$ – чувствительность измеряемой функции F к абсолютному и относительному изменению значения h_n и h_0; K_Δ, $K_{\Delta\delta}$, K_δ – отношение функций чувствительности.

Для свинцового покрытия на алюминии при энергии фотонов E=122 кэВ (радионуклид ^{57}Co) K_Δ=93,4, а при E=60 кэВ (радионуклид ^{241}Am) K_Δ=76,9. Для свинцового покрытия на углероде K_Δ=120,4 и K_Δ=142,8 (значения рассчитаны с использованием линейных коэффициентов ослабления гамма-излучения [2]). Значения $K_{\Delta\delta}$=30 и K_δ могут быть определены по соотношениям:

$$K_{\Delta\delta} = K_\Delta h_0^{-1},\ \ K_\delta = K_\Delta h_n h_0^{-1}.$$

Например, если K_Δ=93,4, а отношение h_0/h_n=30 при h_n=100 мкм свинца и h_0=30 мм алюминия $K_{\Delta\delta}$=31,1 и K_δ=3,11.

Таким образом, данный способ приемлем для случаев малых случайных отклонений абсолютных значений h_0.

Однако, если возможны значительные случайные отклонения толщины основы, необходима реализация других способов контроля, менее чувствительных к этим отклонениям.

В основу предлагаемого способа положен принцип разрешения относительно h_n уравнений, аналогичных уравнению (*), полученных при использовании источника излучения, обеспечивающего две различные энергии гамма-квантов [3].

Тогда

$$F_2 = \frac{N_{01}}{N_1} = \exp(\mu_{n1} h_n + \mu_{01} h_0),$$

$$F_3 = \frac{N_{02}}{N_2} = \exp(\mu_{n2}h_n + \mu_{02}h_0),$$

где N_{01}, N_{02}; N_1, N_2 – потоки гамма-квантов с первой и второй энергией при отсутствии и наличии контролируемого изделия; μ_{n1}, μ_{01}; μ_{n2}, μ_{02} – линейные коэффициенты ослабления излучения материалов покрытия и основы для двух энергий гамма-квантов.

В отличие от реализованного в [3] способа, нами предложен следующий алгоритм обработки информации. В структуру измерителя вводят блок возведения в степень, что обеспечивает

$$F_4 = F_2^{\frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}} = \exp\left(\frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}\mu_{n1}h_n + \mu_{02}h_0\right),$$

либо $$F_5 = F_3^{\frac{\mu_{01}}{\mu_{02}}} = \exp\left(\frac{\mu_{01}}{\mu_{02}}\mu_{n2}h_n + \mu_{01}h_0\right).$$

В этом случае

$$F_6 = \frac{F_4}{F_3} = \exp\left[\left(\frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}\mu_{n1} - \mu_{n2}\right)h_n\right]$$

и $$F_7 = \frac{F_5}{F_2} = \exp\left[\left(\frac{\mu_{01}}{\mu_{02}}\mu_{n2} - \mu_{n1}\right)h_n\right].$$

Таким образом, F_6 и F_7 являются функциями, зависящими лишь от h_n. Эти функции легко разрешаются относительно определяемого параметра, причем функцию F_6 или F_7 выбирают, исходя из значений коэффициентов μ_{n1}, μ_{n2}, μ_{01}, μ_{02}.

Соответственно

$$\psi_1 = \frac{(F_6)'_{h_n}}{F_6} = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}\mu_{n1} - \mu_{n2}$$

и $$\psi_2 = \frac{(F_7)'_{h_n}}{F_7} = \frac{\mu_{01}}{\mu_{02}}\mu_{n2} - \mu_{n1}.$$

В случае, когда атомный номер покрытия существенно больше атомного номера основы, может быть использован принцип разрешения относительно h_n двух уравнений, одно из которых характеризует измеренное значение потока первичного излучения источника, а второе – измеренное значение [4] рентгенофлуоресцентного излучения покрытия. При этом возможны две модификации способа, реализующего этот принцип. Первая модификация предполагает просвечивание изделия со стороны основы, вторая – со стороны покрытия.

Введем обозначение:

$$C = \frac{\tau\rho_n}{\mu_n - \mu_{рфп}},$$

где τ – вероятность возбуждения в покрытии потока $N_{рфп}$ рентгенофлуоресцентного излучения, регистрируемого детектором; ρ_n – плотность материала покрытия; $\mu_{рфп}$ – линейный коэффициент ослабления рентгенофлуоресцентного излучения в покрытии.

При просвечивании изделия со стороны основы имеем F_1 и

$$F_8 = \frac{N_{рфп}}{N_0} = C[\exp(-\mu_{рфп}h_n) - \exp(-\mu_n h_n)]\exp(-\mu_0 h_0).$$

Соответственно

$$F_9 = F_8F_1 = C\{\exp[(\mu_n - \mu_{рфп})h_n] - 1\}$$

и $$\Psi_3 = \frac{(F_9)'_{h_n}}{F_9} = \frac{(\mu_n - \mu_{рфп})\exp[(\mu_n - \mu_{рфп})h_n]}{\exp[(\mu_n - \mu_{рфп})h_n] - 1}.$$

При просвечивании изделия со стороны покрытия алгоритм обработки информации, исключающий влияние параметров основы, имеет более сложный вид. В структуре измерителя нами предложено использовать блок возведения в степень $\mu_{оф}/\mu_0$ или $\mu_0/\mu_{оф}$, где $\mu_{оф}$ – линейный коэффициент ослабления рентгенофлуоресцентного излучения покрытия в основе.

Тогда, если использован блок возведения в степень $\mu_{оф}/\mu_0$ и в эту степень возводят сигнал, соответствующий первичному излучению источника:

$$F_{10} = \frac{N_{рфп}}{N_0} = C[\exp(-\mu_{рфп}h_n) - \exp(-\mu_n h_n)]\exp(-\mu_{оф} h_0),$$

$$F_{11} = (F_1)^{\frac{\mu_{оф}}{\mu_0}} = \exp\left(\frac{\mu_{оф}}{\mu_0}\mu_n h_n + \mu_{оф}h_0\right),$$

$$F_{12} = (F_{10}F_{11}) = C\left\{\begin{array}{l}\exp\left[\left(\frac{\mu_{оф}}{\mu_0}\mu_n - \mu_{рфп}\right)h_n\right] - \\ -\exp\left[\left(\frac{\mu_{оф}}{\mu_0} - 1\right)\mu_n h_n\right]\end{array}\right\}.$$

Введем обозначения:

$$a = \frac{\mu_{оф}}{\mu_0}\mu_n - \mu_{рфп};\ b = \left(\frac{\mu_{оф}}{\mu_0} - 1\right)\mu_n.$$

Тогда:

$$\psi_4 = \frac{(F_{12})'_{h_n}}{F_{12}} = \frac{a\exp(ah_n) - b\exp(bh_n)}{\exp(ah_n) - \exp(bh_n)}.$$

В случае, если в степень $\mu_0/\mu_{оф}$ возводится сигнал, соответствующий потоку рентгенофлуоресцентного излучения, имеем

$$F_{13} = F_{10}^{\frac{\mu_0}{\mu_{оф}}} =$$

$$= \{C[\exp(-\mu_{рфп}h_n) - \exp(-\mu_n h_n)]\}^{\frac{\mu_0}{\mu_{оф}}}\exp(-\mu_0 h_0).$$

Соответственно

$$F_{14} = F_1F_{10}^{\frac{\mu_0}{\mu_{оф}}} =$$

$$= \{C[\exp(-\mu_{рфп}h_n) - \exp(-\mu_n h_n)]\}^{\frac{\mu_0}{\mu_{оф}}}\exp(\mu_n h_n)$$

и

$$\Psi_5 = \frac{(F_{14})'_{h_n}}{F_{14}} =$$

$$= \frac{\mu_0[\mu_n\exp(-\mu_n h_n) - \mu_{рфп}\exp(-\mu_{рфп}h_n)]}{\mu_{оф}[\exp(-\mu_{рфп}h_n) - \exp(-\mu_n h_n)]} + \mu_n.$$

О целесообразности возведения в степень той или иной функции может свидетельствовать следующее. Пусть контролируется свинцовое покрытие на алюминиевой основе, а в качестве источника использован составной радионуклидный излучатель ^{241}Am+^{57}Co. В случае, если в степень возводится функция, соответствующая излучению ^{241}Am, значение $|\Psi|=6{,}7$. Если в степень возводится функция, соответствующая излучению ^{57}Co, значение $|\Psi|=11{,}9$.

Выводы

Надежность результатов трансмиссионного гамма-контроля покрытий на основах со случайно изменяющейся толщиной может быть обеспечена лишь путем измерения прошедших через композит двух потоков излучения с различными энергиями гамма-квантов, при этом могут быть измерены поток первичного излучения моноэнергетического источника и поток рентгенофлуресцентного излучения покрытия. Установлена целесообразность возведения значения одного из сигналов в степень, равную отношению коэффициентов ослабления излучения этих энергий для материала основы. Дальнейшее сопоставление неискаженного сигнала и трансформированного таким образом второго сигнала обеспечивает однозначную информацию о толщине покрытия вне зависимости от случайных изменений толщины основы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забродский В.А. Применение обратно-рассеянного рентгеновского излучения в промышленности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
2. Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001–100 МэВ и элементов с 1 по 100). Справочник. Перевод с англ. – М.: Атомиздат, 1973. – 256 с.
3. Недавний О.И., Осипов С.П., Сидуленко О.А. Оценка возможностей гамма-абсорбционного способа измерения толщины слоев многослойных изделий // Дефектоскопия. – 1995. – № 11. – С. 74–81.
4. Мамиконян С.В. Аппаратура и методы флуоресцентного рентгенорадиометрического анализа. – М.: Атомиздат, 1976. – 324 с.

УДК 539.1.074